

PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

(11)Publication number : 2002-268104

(43)Date of publication of application : 18.09.2002

(51)Int.Cl.

G02F 1/35
H04B 10/00

(21)Application number : 2001-065010

(71)Applicant : NIPPON TELEGR & TELEPH CORP
<NTT>

(22)Date of filing : 08.03.2001

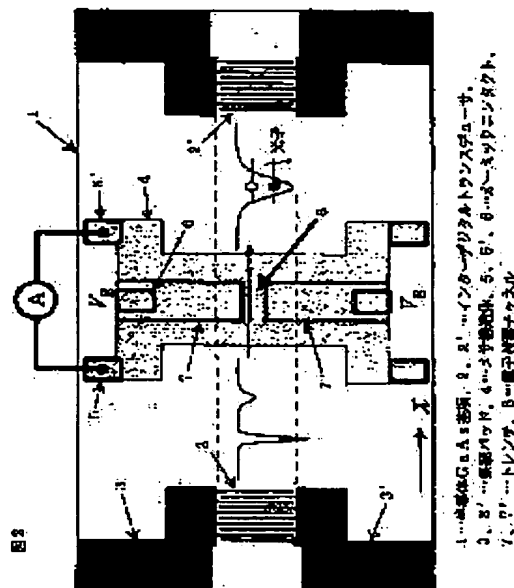
(72)Inventor : MATSUDA KENICHI
HATANAKA NORIYUKI
TAKAYANAGI HIDEAKI

(54) METHOD AND DEVICE FOR SINGLE PHOTON GENERATION

(57)Abstract:

PROBLEM TO BE SOLVED: To provide a method and a device for single photon generation which generate photon having an arbitrary angular frequency at arbitrary time.

SOLUTION: As for a single photon generating device formed on a semiconductor GaAs substrate 1, a surface acoustic wave is generated by driving an inter-digital transducer 2 with a voltage to generate a small-amplitude soliton and a large-amplitude soliton in this order on the surface of the semiconductor GaAs substrate 1, and the single photon is generated by electron transition caused by the collision and interaction between the small-amplitude soliton having acquired an electron and the large-amplitude soliton having acquired no electron after the small-amplitude soliton is made to acquire the electron in a common part between a soliton travel passage and a two-dimensional gas area of a mesa structure 4, i.e., an electron acquisition channel 8, thus constituting the method and device for single photon generation.



LEGAL STATUS

[Date of request for examination]

14.08.2002

[Date of sending the examiner's decision of rejection]

[Kind of final disposal of application other than the examiner's decision of rejection or application converted registration]

[Date of final disposal for application]

[Patent number]

[Date of registration]

[Number of appeal against examiner's decision of rejection]

[Date of requesting appeal against examiner's decision of rejection]

[Date of extinction of right]

(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号
特開2002-268104
(P2002-268104A)

(43) 公開日 平成14年9月18日 (2002.9.18)

(51) Int.Cl. ⁷	識別記号	F I	テマコード* (参考)
G 0 2 F 1/35		G 0 2 F 1/35	2 K 0 0 2
H 0 4 B 10/00		H 0 4 B 9/00	Z 5 K 0 0 2

審査請求 未請求 請求項の数6 O L (全 7 頁)

(21) 出願番号 特願2001-65010 (P2001-65010)

(22) 出願日 平成13年3月8日 (2001.3.8)

(71) 出願人 000004226

日本電信電話株式会社
東京都千代田区大手町二丁目3番1号

(72) 発明者 松田 健一

東京都千代田区大手町二丁目3番1号 日
本電信電話株式会社内

(72) 発明者 畠中 憲之

東京都千代田区大手町二丁目3番1号 日
本電信電話株式会社内

(74) 代理人 100075753

弁理士 和泉 良彦 (外1名)

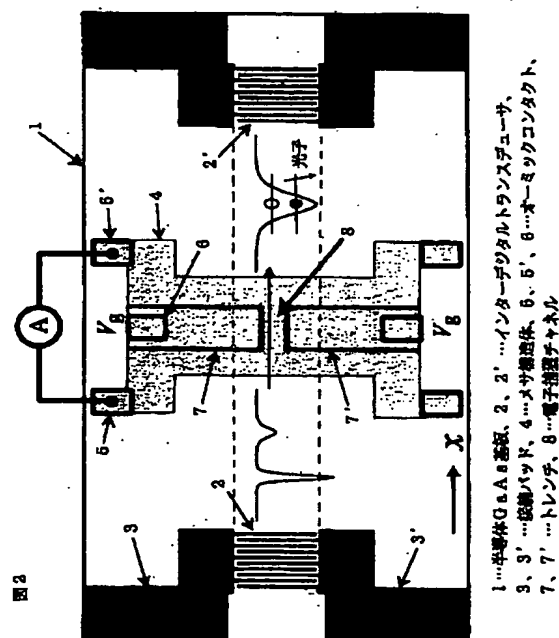
最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 単一光子発生方法および単一光子発生装置

(57) 【要約】

【課題】 任意の角周波数を有する光子を任意の時間に発生させる単一光子発生方法および単一光子発生装置を提供すること。

【解決手段】 半導体GaAs基板1の上に形成された単一光子発生装置において、インターデジタルトランスデューサ2を電圧駆動して表面音響波を発生させ、それによって、振幅の小さいソリトンと振幅の大きいソリトンとを、半導体GaAs基板1表面に、この順に生成し、ソリトン進行通路とメサ構造体4の2次元電子ガス領域との共通部分すなわち電子捕獲チャネル8において、振幅の小さいソリトンに電子を捕獲させた後、電子を捕獲した振幅の小さいソリトンと電子を捕獲していない振幅の大きいソリトンとの衝突、相互作用によって起こる電子遷移によって単一光子を発生させることを特徴とする単一光子発生方法および単一光子発生装置を構成する。



【特許請求の範囲】

【請求項1】単一光子発生方法であって、
 第1のソリトンを生成し、
 前記第1のソリトンに電子を捕獲させ、
 前記第1のソリトンより振幅の大きい第2のソリトンを生成し、
 前記第1のソリトンと前記第2のソリトンとを衝突させ、前記第1のソリトンの束縛準位から前記第2のソリトンの束縛準位に電子を遷移させて光子を放出させることを特徴とする単一光子発生方法。
 【請求項2】請求項1に記載の単一光子発生方法であって、前記ソリトンが、可積分非線形分散方程式に従うことを特徴とする単一光子発生方法。
 【請求項3】単一光子発生方法であって、
 第1番目のソリトンを生成し、
 前記第1番目のソリトンに電子を捕獲させ、

第N番目（Nは2以上の整数とする）のソリトンとして、第N-1番目のソリトンよりも振幅の大きなソリトンを生成し、
 全ての前記ソリトンについて、必ず前記第N-1番目のソリトンと前記第N番目のソリトンが衝突してから、前記第N番目のソリトンと前記第N+1番目のソリトンの衝突が起こるように、前記ソリトンの振幅と生成のタイミングとを調整することによって、時間間隔を置いて複数の光子を1つずつ発生させることを特徴とする単一光子発生方法。
 【請求項4】請求項3に記載の単一光子発生方法であって、
 生成されたソリトン列が次の方程式を満たすことを特徴とする単一光子発生方法。

【数1】

$$u(x, t) = \sum_{n=1}^N -2\kappa_n^2 \operatorname{sech}^2\{\kappa_n(x - x_n) - 4\kappa_n^2 t\} \quad (1)$$

ここで、

$$x_n = \frac{n(n-1)}{2} \Delta v T + \sum_{i=1}^{n-1} \left\{ \frac{1}{2} (\delta_{i,i+1} - \Delta_{i,i+1}) + \Delta_{i,n} \right\} \quad (2)$$

$$\delta_{i,i+1} = \frac{1}{\sqrt{\kappa_i}} \ln \frac{\kappa_{i+1} + \kappa_i}{\kappa_{i+1} - \kappa_i} \quad (3)$$

$$\Delta_{i,i+1} = \frac{1}{\sqrt{\kappa_{i+1}}} \ln \frac{\kappa_{i+1} + \kappa_i}{\kappa_{i+1} - \kappa_i} \quad (4)$$

であり、 x はソリトンの進行方向に平行に設けた位置座標の値であり、
 t は時間であり、 $u(x, t)$ は位置 x 、時間 t における波の変位であり、 κ_n は第 n 番目のソリトンの波数であり、 Δv はとなり合うソリトン間の速度差であり、 T は前記時間間隔である。

【請求項5】単一光子発生装置であって、
 ソリトン発生手段と、
 ソリトン伝播媒体と、
 電子捕獲部と、
 ソリトン相互作用部とを有することを特徴とする単一光子発生装置。

【請求項6】請求項5に記載の単一光子発生装置であって、
 前記ソリトン発生手段は表面弾性波発生装置であり、
 前記ソリトン伝播媒体は半導体基板表面であり、
 前記電子捕獲部は、前記半導体基板表面に形成された2次元電子ガス領域とソリトン進行通路である1次元ソリトン伝播チャネルとの共通部分であることを特徴とする単一光子発生装置。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は、単一光子発生方法

および単一光子発生装置に関するものである。

【0002】

【従来の技術】光通信では、光の振幅、あるいは周波数を変調することによって情報を伝送している。この場合、光子の集団を対象にしているが、光子1個を単位とした情報伝達は究極の光通信と言える。したがって、単一光子の規則的な流れを作り出すことは、量子情報処理の基本要素である。

【0003】これまで、単一光子発生を可能にするものとして単一電子ターンスタイルの原理にもとづいた発光素子が開発された(J. Kim, O. Benson, H. Kan and Y. Yamamoto, Nature 397, 500 (1999) 参照)。これは微小トンネル接合における電子のクーロンブロッケイド効果を利用したものである。その光子生成の仕組みは、電子と正孔との再結合によって単一光子を発生させる従来の発光原理に加え、あたかも回転ドアを通過するが如く、時間的に規則正しく単一の電子と単一の正孔を結合層に

注入するクーロンブロッケイド効果によって、規則正しい単一光子発生を実現するというものである。

【0004】

【発明が解決しようとする課題】上記のターンスタイル素子では、発生光子の角周波数が素子の再結合層のエネルギーギャップの大きさによって制限される。また、光子生成時間もトンネル接合の静電容量によって決まり、一度素子を構成すると、光子生成時間を容易に変える事はできない。したがって任意の角周波数を有する光子を任意の時間に発生させることは不可能である。

【0005】本発明はそのような問題点を解決するためになされたものであり、任意の角周波数を有する光子を任意の時間に発生させる単一光子発生方法および単一光子発生装置を提供することを目的としている。

【0006】

【課題を解決するための手段】前記課題を解決するために、本発明は、請求項1に記載のように、単一光子発生方法であって、第1のソリトンを生成し、前記第1のソリトンに電子を捕獲させ、前記第1のソリトンより振幅の大きい第2のソリトンを生成し、前記第1のソリトンと前記第2のソリトンとを衝突させ、前記第1のソリトンの束縛準位から前記第2のソリトンの束縛準位に電子を遷移させて光子を放出させることを特徴とする単一光

子発生方法を構成する。

【0007】また、本発明は、請求項2に記載のように、請求項1に記載の単一光子発生方法であって、前記ソリトンが、可積分非線形分散方程式に従うことを特徴とする単一光子発生方法を構成する。

【0008】また、本発明は、請求項3に記載のように、単一光子発生方法であって、第1番目のソリトンを生成し、前記第1番目のソリトンに電子を捕獲させ、第N番目(Nは2以上の整数とする)のソリトンとして、第N-1番目のソリトンよりも振幅の大きなソリトンを生成し、全ての前記ソリトンについて、必ず前記第N-1番目のソリトンと前記第N番目のソリトンが衝突してから、前記第N番目のソリトンと前記第N+1番目のソリトンの衝突が起こるように、前記ソリトンの振幅と生成のタイミングとを調整することによって、時間間隔を置いて複数の光子を1つずつ発生させることを特徴とする単一光子発生方法を構成する。

【0009】また、本発明は、請求項4に記載のように、請求項3に記載の単一光子発生方法であって、生成されたソリトン列が次の方程式を満たすことを特徴とする単一光子発生方法を構成する。

【0010】

【数2】

$$u(x, t) = \sum_{n=1}^N -2\kappa_n^2 \operatorname{sech}^2[\kappa_n(x - x_n) - 4\kappa_n^3 t] \quad (1)$$

ここで、

$$x_n = \frac{n(n-1)}{2} \Delta v T + \sum_{i=1}^{n-1} \left\{ \frac{1}{2} (\delta_{i,i+1} - \Delta_{i,i+1}) + \Delta_{i,n} \right\} \quad (2)$$

$$\delta_{i,i+1} = \frac{1}{\sqrt{\kappa_i}} \ln \frac{\kappa_{i+1} + \kappa_i}{\kappa_{i+1} - \kappa_i} \quad (3)$$

$$\Delta_{i,i+1} = \frac{1}{\sqrt{\kappa_{i+1}}} \ln \frac{\kappa_{i+1} + \kappa_i}{\kappa_{i+1} - \kappa_i} \quad (4)$$

であり、 x はソリトンの進行方向に平行に設けた位置座標の値であり、 t は時間であり、 $u(x, t)$ は位置 x 、時間 t における波の変位であり、 κ_n は第 n 番目のソリトンの波数であり、 Δv はとなり合うソリトン間の速度差であり、 T は前記時間間隔である。

また、本発明は、請求項5に記載のように、単一光子発生装置であって、ソリトン発生手段と、ソリトン伝播媒体と、電子捕獲部と、ソリトン相互作用部とを有することを特徴とする単一光子発生装置を構成する。

【0011】また、本発明は、請求項6に記載のように、請求項5に記載の単一光子発生装置であって、前記ソリトン発生手段は表面弾性波発生装置であり、前記ソリトン伝播媒体は半導体基板表面であり、前記電子捕獲部は、前記半導体基板表面に形成された2次元電子ガス領域とソリトン進行通路である1次元ソリトン伝播チャ

ネルとの共通部分であることを特徴とする単一光子発生装置を構成する。

【0012】

【発明の実施の形態】本発明は、ソリトン型ポテンシャル中に束縛された電子を利用したサブボアソン単一光子発生方法および単一光子発生装置に関する。この場合に、ソリトンとしては、可積分非線形分散方程式に従うソリトンを利用することができる。ここに、「可積分非線形分散方程式」とは、波の変位に関する非線形微分方程式であって、波の速度を波の振幅の関数とするもので

あり、その一例が後述のKdV方程式である。また、上記の式(1)で表されるソリトン($N=1$ の場合以外はソリトン列)は上記の「可積分非線形分散方程式に従うソリトン」の一例となっている。

【0013】本発明においては、任意の時間に任意の波長の単一光子を発生させるために、ソリトンポテンシャルを利用する。

【0014】単一光子の発生は一般に量子力学的遷移に基づいており、その量子遷移は波動関数の重なりによって決定される。したがって、この重なりを外部より制御することによって発光過程を制御することが可能となる。この制御がソリトンによって如何に行われるか次に述べる。

【0015】まず、ソリトンとは、非線形効果と分散効果とが釣り合った孤立波である。ソリトンはその伝播および他のソリトンとの衝突に対して安定であるため、通信や次に述べるソリトン輸送へ応用される。

【0016】ソリトンとは、電子に対してポテンシャルとして働くと、電子を捕獲し、ソリトンの伝播とともに電子を輸送することが可能となる(T. Sakuma and N. Nishiguchi, Jpn. J. Appl. Phys. 30, 137 (1991)参照)。これがソリトン輸送である。特に、KdV方程式(Korteweg-de Vries 方程式)を満足するソリトンでは、ソリトンポテンシャル中にただ1つの束縛準位しか存在しない。したがって、量子遷移など起こらず、発光に対しても安定である。ここで、より深いエネルギー準位をもったソリトンポテンシャルを用意し、前述の電子を束縛したソリトンと衝突させる。この、より深いエネルギー準位をもったソリトンポテンシャルは、振幅がより大きいソリトンを生成することによって得られる。衝突前、波動関数の重なりはほとんど0であるので量子遷移は禁止される。したがって発光過程も禁止される。しかし、相互作用中心では、重なりは最大になり、よりエネルギーの低い状態に電子の遷移が可能となる。このとき準位差に相当したエネルギーをもつ光子が発生する。衝突後、再び波動関数の重なりは消え発光過程は禁止される。したがって、ソリトンポテンシャルの衝突のタイミングを制御する事によって、任意の時刻に単一光子を発生させる事が可能となる。この概念図を図1に示す。

【0017】図1において、縦方向はポテンシャルおよび波動関数を表し、横方向は位置を表し、(a)～(e)は各瞬間におけるソリトンと電子の状態を表し、時間は(a)から(e)に向けて経過している。ただし、波動関数の原点はソリトンによって変えてある。図1の(a)は、電子を捕獲した第1のソリトンの後に、第1のソリトンより振幅の大きい第2のソリトンが生成された状態を示し、(b)は、第2のソリトンが、その速さが第1のソリトンよりも速いので、第1のソリトンに近づく状態を示し、(c)は、第2のソリトンが第1のソリトンに追いつき、電子の量子遷移と光子放出とが

起こる状態を示し、(d)および(e)は、電子を捕獲した第2のソリトンが第1のソリトンを追いついて行く状態を示している。

【0018】また、ソリトンの振幅を制御することによって発生光子の波長も制御できる。更に、適当に配置された複数のソリトン列によって、次々と規則正しく単一光子を発生させる事が可能となる。

【0019】(実施の形態例1)図2は、本発明に係る単一光子発生装置の一例と、それを用いた単一光子発生方法を説明する図である。

【0020】図2において、単一光子発生装置は半導体GaAs基板1の上に形成されており、その構成要素として、表面音響波(SAW)を発生するインターデジタルトランスデューサ(IDT)2と、インターデジタルトランスデューサ2を電圧駆動するための金(Au)の接続パッド3、3'と、GaAs基板1表面に2次元電子ガス生成領域を有するメサ構造体4と、メサ構造体4へのオーミックコンタクト5、5'、6とを備えている。なお、インターデジタルトランスデューサ2の極型電極はNiCrAlで形成されている。

【0021】図2に示した単一光子発生装置において、インターデジタルトランスデューサ2を電圧駆動すると、表面音響波(SAW)が発生し、SAWは半導体の非線形弾性効果と分散効果が釣り合い、自発的に表面弾性波ソリトンになり、GaAs基板1表面を右方向に進行する。そのソリトンの進行通路(図2の平行鎖線で挟まれた領域)を1次元ソリトン伝播チャンネルと呼ぶ。

【0022】図2において、請求項5に記載の「ソリトン発生手段」は表面弾性波発生装置であるインターデジタルトランスデューサ2に該当し、「ソリトン伝播媒体」はGaAs基板1の表面に該当し、「電子捕獲部」は、メサ構造体4中にエッチングによって形成されたトレンチ7、7'に挟まれた半導体GaAs基板の表面部分である電子捕獲チャンネル8(この部分には2次元電子ガスが存在する)に該当し、「ソリトン相互作用部」は、電子捕獲チャンネル8と右側のインターデジタルトランスデューサ2'との間に位置する半導体GaAs基板の表面に該当する。

【0023】以下に、図2に示した単一光子発生装置によって単一光子を発生させる方法について説明する。

【0024】まず、半導体GaAs基板1の表面に配置したインターデジタルトランスデューサ2を駆動して表面音響波(SAW)を発生させる。発生したSAWは半導体の非線形弾性効果と分散効果が釣り合い、自発的に表面弾性波ソリトンになり、GaAs基板1表面を右方向に進行する。この時、ソリトンの振幅は、SAWを発生させる際、インターデジタルトランスデューサ2に印加した電圧によって決定される。したがって、異なる振幅を持つソリトンを形成することは、異なる電圧を与えることによって達成される。この方法によって、単一光

子発生のために2つの振幅の異なるソリトンを生成する。一方は振幅の小さい電子捕獲用ソリトンであり、他方は振幅の大きな空のソリトンである。以下、前者を捕獲ソリトン、後者をターゲットソリトンと呼ぶ。生成の順序は、捕獲ソリトンそしてターゲットソリトンである。2つのソリトンは、捕獲ソリトンが前、ターゲットソリトンが後となって、右方向に進行する。

【0025】次に、捕獲ソリトンに電子を捕獲させる。そのために、ソリトン進行通路（1次元ソリトン伝播チャンネル）とメサ構造体4の2次元電子ガス領域との共通部分すなわち電子捕獲チャンネル8における2次元電子ガスのフェルミ準位を調節することによって電子をソリトンに捕獲、束縛させる（C. H. W. Barnes, J. M. Shilton and A. M. Robinson, Phys. Rev. B 62, 8410 (2000) 参照）。2次元電子ガスのフェルミ準位の調節は、オーミックコンタクト6に印加する電圧 V_g を変えることによって行う。一方、ターゲットソリトンに対しては、フェルミ準位を変えて、空のまま電子捕獲チャンネル8を通過させる。

【0026】次に、1次元ソリトン伝播チャンネル中のソ

リトン相互作用部、すなわち、電子捕獲チャンネル8とその右側のインターデジタルトランスデューサ2'との中間に位置する半導体GaAs基板の表面において、捕獲ソリトンとターゲットソリトンとを衝突、相互作用させて、単一光子を発生させる。

【0027】なお、図2において、Aで示された電流計はソリトンによる電子の捕獲を検知するためのものであり、インターデジタルトランスデューサ2'はソリトンを検知するためのものである。

【0028】実施の形態例1においては、単一光子発生装置を半導体GaAs基板1の上に形成したが、半導体GaAs基板1に代えて、シリコンなどの半導体基板を用いてもよい。

【0029】（実施の形態例2）実施の形態例1で示した方法でソリトンを生成する。ただし、ソリトンの配置は次に示すようにソリトンを生成する。これによって、単一光子は一定の時間間隔Tで発生する。

【0030】

【数3】

$$u(x, t) = \sum_{n=1}^N -2\kappa_n^2 \operatorname{sech}^2[\kappa_n(x - x_n) - 4\kappa_n^2 t] \quad (1)$$

ここで、

$$x_n = \frac{n(n-1)}{2} \Delta v T + \sum_{i=1}^{n-1} \left\{ \frac{1}{2} (\delta_{i,i+1} - \Delta_{i,i+1}) + \Delta_{i,n} \right\} \quad (2)$$

$$\delta_{i,i+1} = \frac{1}{\sqrt{\kappa_i}} \ln \frac{\kappa_{i+1} + \kappa_i}{\kappa_{i+1} - \kappa_i} \quad (3)$$

$$\Delta_{i,i+1} = \frac{1}{\sqrt{\kappa_{i+1}}} \ln \frac{\kappa_{i+1} + \kappa_i}{\kappa_{i+1} - \kappa_i} \quad (4)$$

であり、 x はソリトンの進行方向に平行に設けた位置座標の値であり、 t は時間であり、 $u(x, t)$ は位置 x 、時間 t における波の変位であり、 κ_n は第 n 番目のソリトンの波数であり、 Δv はとなり合うソリトン間の速度差であり、 T は前記時間間隔である。

図3はソリトンの軌跡と相互作用の様子を示している。図中の黒丸は、捕獲ソリトンとターゲットソリトンとの相互作用によって単一光子が発生する位置と時間とを示している。

【0031】

【発明の効果】以上に説明したように、本発明の実施により、任意の角周波数を有する光子を任意の時間に発生させる単一光子発生方法および単一光子発生装置を提供することが可能となる。

【0032】近年、量子情報処理についての様々な研究がなされている。その実現には、究極の情報伝達単位である単一光子を任意に制御できることが非常に重要な課題となっている。本発明の実施によって、この課題が解

決され、いままで不可能であった単一の光子を任意に発生させることが可能となる。それによって完全に安全な量子暗号の実現などが可能となり、この分野における本発明の貢献は計り知れない。

【図面の簡単な説明】

【図1】本発明に係る単一光子発生方法を説明する図である。

【図2】本発明に係る単一光子発生装置を説明する図である。

【図3】実施の形態例2におけるソリトンの軌跡と相互作用の様子を説明する図である。

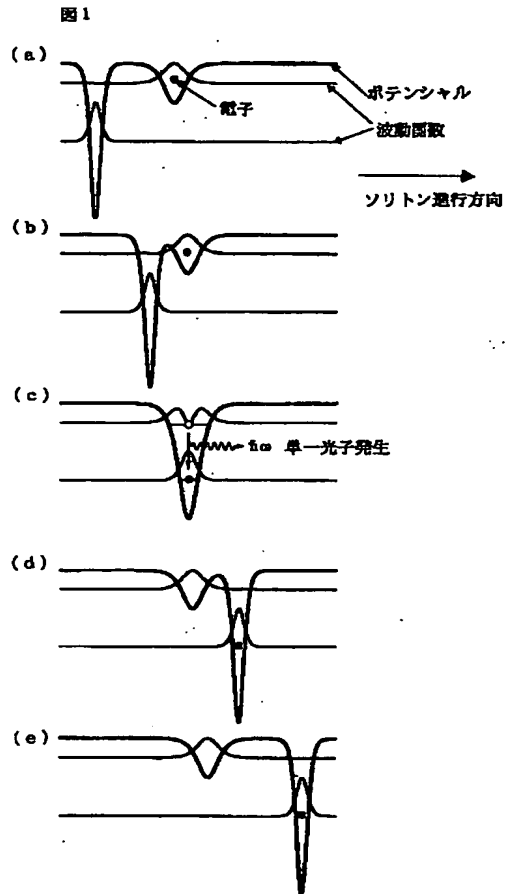
【符号の説明】

1…半導体GaAs基板、2、2'…インターデジタル

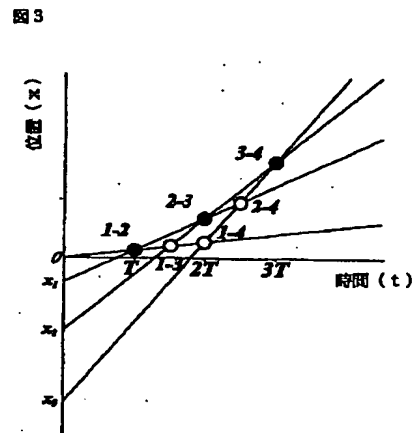
トランスデューサ、3、3' ...接続パッド、4...メサ構造体、5、5'、6...オーミックコンタクト、7、7'

...トレンチ、8...電子捕獲チャネル。

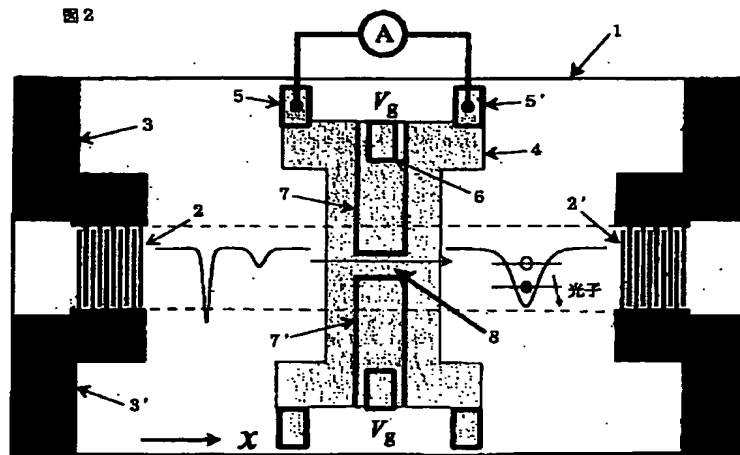
【図1】



【図3】



【図2】



1…半導体GaAs基板、2、2'…インターデジタルトランスデューサ、
3、3'…接続パッド、4…メサ構造体、5、5'、6…オーミックコンタクト、
7、7'…トレンチ、8…電子輸送チャネル

フロントページの続き

(72)発明者 ▲高▼柳 英明
東京都千代田区大手町二丁目3番1号 日
本電信電話株式会社内

Fターム(参考) 2K002 AA02 AB32 BA12 CA13 CA30
DA05 EB07 GA10 HA25
5K002 BA01 BA07 DA14